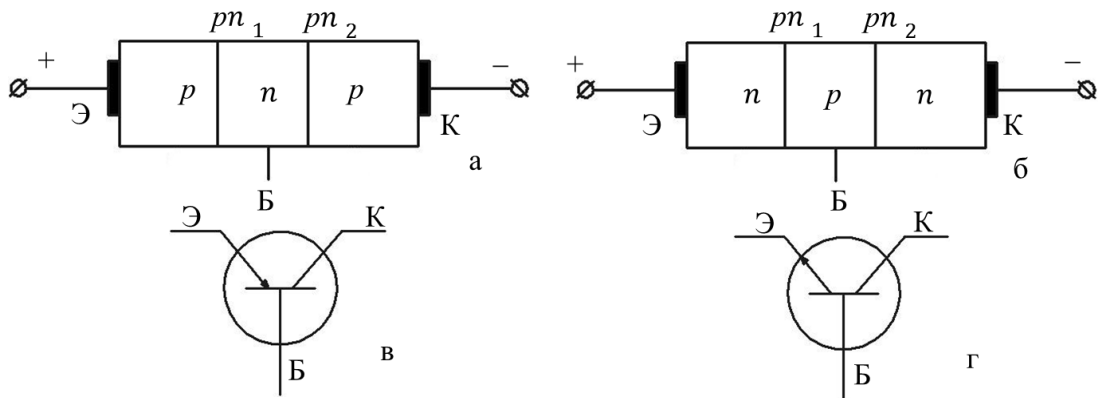


Лекция 18. Транзисторы. Схемы их включения и коэффициенты усиления по току, напряжению и мощности

Транзистор – трехслойный ($p-n-p$ или $n-p-n$) n/p с двумя $p-n$ -переходами для усиления входного сигнала.

Биполярные транзисторы (или просто транзисторы) имеют три вывода: **коллектор К**, **базу Б** и **эмиттер Э**. В зависимости от комбинации $p-n$ -перехода транзисторы делятся на два типа: **$p-n-p$** и **$n-p-n$** .

На границе раздела двух переходов образуются области, обедненные

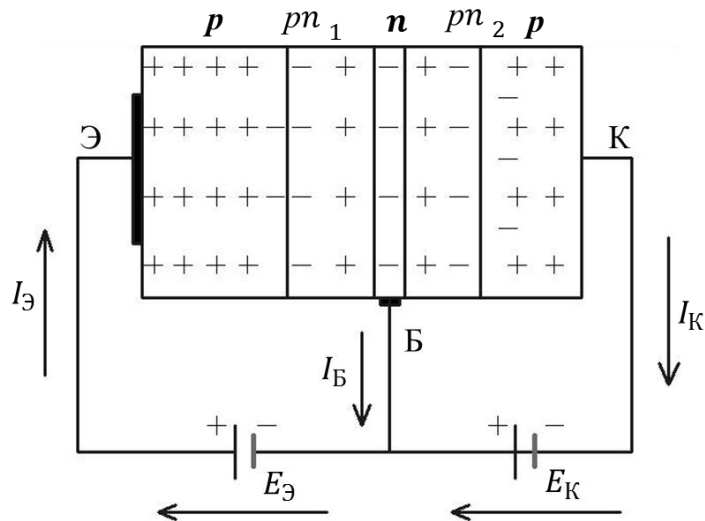


носителями тока (*запирающий слой*). **Наличие трех полупроводников в плоском триоде приводит к образованию двух запирающих слоев (pn_1 и pn_2)**. Триод как бы представляет собой два диода, соединенных последовательно навстречу друг другу (рис. 3.11).

Рис. 3.11. Схемы транзисторов типа $p-n-p$ с прямой (а) и $n-p-n$ с обратной (б) проводимостями; условные обозначения $p-n-p$ (в) и $n-p-n$ (г): Э – эмиттер; Б – база; К – коллектор; pn_1 – открытый $p-n$ -переход; pn_2 – закрытый $p-n$ -переход

Рис. 3.12. Принцип действия транзистора типа $p-n-p$

Устройство германиевого транзистора типа $p-n-p$ (рис. 3.12). В кристалл Ge (с электронной проводимостью) с двух сторон вплавлены кусочки In с дырочной



проводимостью. Кристалл *Ge* электронной проводимостью называется базой. Область кристалла *In* с дырочной проводимостью и *n-p* переходом малой площади называется *эмиттером*, а переход – *эмиттерным n-p переходом*. Область кристалла *In* с дырочной проводимостью и *n-p* переходом большой площади называется *коллектором*, а переход – *коллекторным n-p переходом*.

Принцип действия транзистора типа *p-n-p*. Чтобы полупроводниковый триод работал как усилитель, его надо соединить с двумя внешними источниками тока $E_э$ и $E_к$, при этом один переход включается в прямом *эмиттерном* направлении, а второй – в обратном *коллекторном* направлении.

Если вход транзистора соединить с источником $E_э$, то *эмиттерный n-p* переход откроется и через него в обоих направлениях пойдут основные носители зарядов: *электроны из базы в эмиттер и дырки из эмиттера в базу через открытый pn_1 переход*.

Поскольку *дырки в базе* являются *неосновными носителями* зарядов, а ширина базы меньше диффузионной длины пробега электрических зарядов, то они создадут *диффузионный ток* в направлении к *коллекторному n-p переходу*, вызывая резкое увеличение коллекторного тока.

Заряды дырок (из эмиттера через базу в коллектор) будут компенсированы в коллекторе электронами, приходящими из внешней цепи $E_к$ и создающими в ней ток коллектора $I_к$.

Электроны (основные носители зарядов в базовой области), под действием электрического поля ЭДС $E_э$, пройдя через *эмиттерный n-p переход*, создадут *ток базы $I_б$* .

Коэффициент передачи по току $\alpha = I_к/I_э$ (при $U=const$). Как правило, $\alpha = 0,92 - 0,99$.

В соответствии с первым законом Кирхгофа:

$$I_э = I_б + I_к = I_б + \alpha I_э,$$

откуда $I_б = I_э(1 - \alpha)$ или $I_б = I_к \frac{1 - \alpha}{\alpha}$

Схемы включения транзисторов и их коэффициенты усиления по переменному току

При анализе схем включения транзисторов можно рассматривать их без источников питания.

Рассмотрим три возможных схемы включения транзисторов: (рис. 3.13).

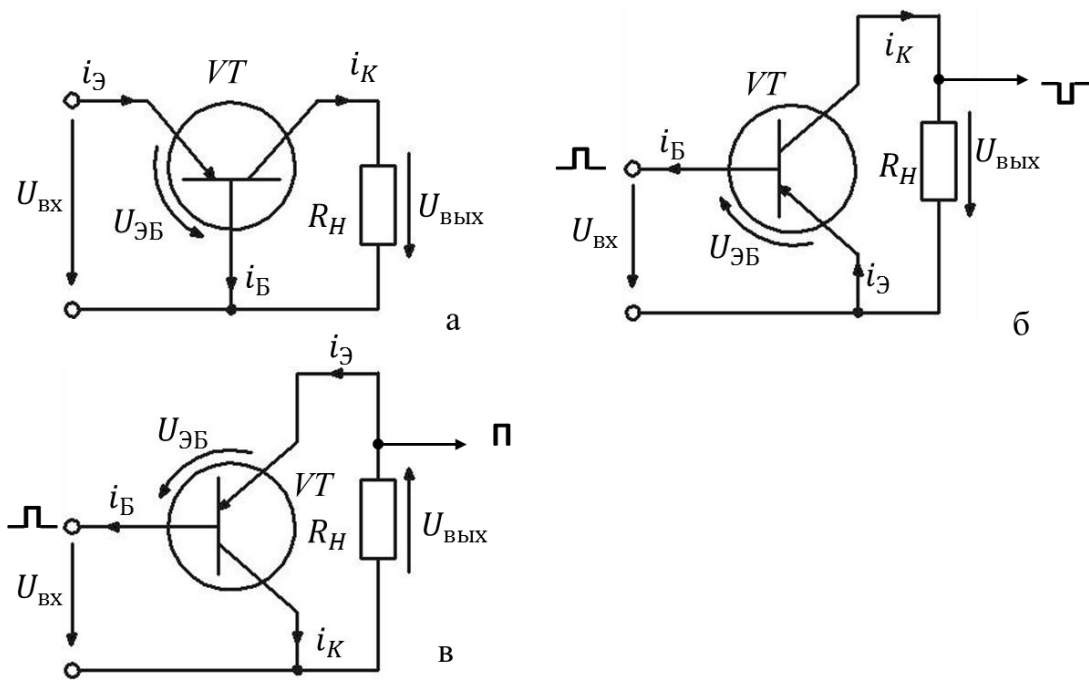


Рис. 3.13. Схемы включения транзисторов:

а – с общей базой (ОБ); б – с общим эмиттером (ОЭ); в – с общим коллектором (ОК); R_H – сопротивление нагрузки

Схема с общей базой «ОБ» – базовый электрод является общим для входной и выходной цепей (рис. 3.13, а).

Коэффициент усиления по току:

$$K_i = \frac{I_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВХ}}} = \frac{i_K}{i_{\text{Э}}} = \alpha < 1.$$

Усиления **по току не происходит** ($K_i < 1$).

Коэффициент усиления по напряжению:

$$K_u = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{i_K R_H}{i_{\text{Э}} R_{\text{ВХ}}} = \frac{\alpha R_H}{R_{\text{ЭБ}}} > 1.$$

Определим $R_{\text{ВХ}}$:

$$R_{\text{ВХ}} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{I_{\text{ВХ}}} = \frac{U_{\text{ЭБ}}}{i_{\text{Э}}} = R_{\text{ЭБ}} \approx 20 \div 200 \text{ Ом.}$$

$R_H \approx 10000 \text{ Ом}$, т.е. $R_H \gg R_{\text{ЭБ}}$.

Происходит усиление **по напряжению** ($K_u > 1$).

Коэффициент усиления по мощности:

$$K_p = K_i \cdot K_u = \alpha^2 \frac{R_H}{R_{\text{ЭБ}}} > 1.$$

Происходит усиление **по мощности** ($K_p > 1$).

Схема с общим эмиттером «ОЭ» (рис. 3.13, б) является наиболее распространенной схемой включения транзистора.

Коэффициент усиления по току:

$$K_i = \frac{I_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВХ}}} = \frac{i_K}{i_{\text{Э}}} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} > 1.$$

Происходит усиление по току ($K_i > 1$).

Коэффициент усиления по напряжению:

$$K_u = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{i_K R_H}{i_{\text{Э}} R_{\text{ВХ}}} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \cdot \frac{R_H}{R_{\text{ВХ}}} > 1 \quad (3.1)$$

Определим $R_{\text{ВХ}}$:

$$R_{\text{ВХ}} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{I_{\text{ВХ}}} = \frac{U_{\text{ЭБ}}}{i_{\text{Б}}} = \frac{U_{\text{ЭБ}}}{i_{\text{Э}}(1 - \alpha)} = \frac{R_{\text{ЭБ}}}{1 - \alpha}, \quad (3.2)$$

так как $\frac{U_{\text{ЭБ}}}{i_{\text{Э}}} = R_{\text{ЭБ}}$.

Подставив $R_{\text{ВХ}}$ из (3.2) в уравнение (3.1), получим:

$$K_u = \frac{\alpha \cdot R_H}{1 - \alpha} \cdot \frac{1 - \alpha}{R_{\text{ЭБ}}} = \frac{\alpha \cdot R_H}{R_{\text{ЭБ}}} > 1. \quad (3.3)$$

Так как $R_H \gg R_{\text{ЭБ}}$, то **напряжение** в схеме **усиливается** ($K_u > 1$).

Коэффициент усиления по мощности:

$$K_p = K_i \cdot K_u = \frac{\alpha^2}{1 - \alpha} \frac{R_H}{R_{\text{ЭБ}}} > 1.$$

Мощность усиливается ($K_p > 1$).

Схема с «ОЭ» широко применяется в усилительных каскадах, так как усиливаются *ток, напряжение и мощность*.

Схема с общим эмиттером называется также «усилителем напряжения» или «**инвертором**». Если на его вход подать сигнал в виде прямоугольного импульса, то на выходе получим прямоугольный импульс «повернутый» на 180° (рис. 3.13, б).

Схема с общим коллектором «ОК» (рис. 3.13, в).

Коэффициент усиления по току:

$$K_i = \frac{i_{\text{ВЫХ}}}{i_{\text{ВХ}}} = \frac{i_{\text{Э}}}{i_{\text{Б}}} = \frac{1}{1 - \alpha} > 1.$$

Происходит усиление тока ($K_i > 1$).

Коэффициент усиления по напряжению:

$$K_u = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{i_{\text{Э}} R_H}{i_{\text{Б}} R_{\text{ВХ}}}. \quad (3.4)$$

Определим $R_{\text{ВХ}}$ из 2-го закона Кирхгофа для замкнутой цепи (рис 3.13, в):

$$0 = U_{\text{ВЫХ}} + U_{\text{ЭБ}} - U_{\text{ВХ}},$$

откуда:

$$U_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВЫХ}} + U_{\text{ЭБ}} = i_{\text{Э}} R_H + i_{\text{Б}} R_{\text{ЭБ}} \approx i_{\text{Э}} R_H.$$

Так как $R_{\text{ЭБ}} \ll R_H$, то

$$R_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вх}}}{i_{\text{вх}}} = \frac{i_{\text{э}} R_{\text{н}}}{i_{\text{б}}}. \quad (3.5)$$

Подставив $R_{\text{вх}}$ из (3.5) в уравнение (3.4), получим:

$$K_u = \frac{i_{\text{э}} R_{\text{н}} i_{\text{б}}}{i_{\text{б}} i_{\text{э}} R_{\text{н}}} = 1.$$

Напряжение в схеме с «ОК» *не усиливается* ($K_u = 1$) и работает как *согласующий усилитель*.

Коэффициент усиления по мощности:

$$K_p = K_i \cdot K_u = \frac{1}{1 - \alpha} > 1.$$

Мощность в схеме усиливается ($K_p > 1$).

Схема используется как *согласующие усилители* с большим сопротивлением на входе, называется также «*эмиттерным повторителем*» или «усилителем мощности» (рис. 3.13, в). Если на его вход подать *прямоугольный импульс, то на выходе* получим импульс, повторяющий входной сигнал.